

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DOBRA NA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE UM PERFIL DE AÇO FORMADO A FRIO APLICADO NO SETOR DE ESTRUTURAS METÁLICAS

Fábio Sumara Custódio (1), Marcio Vito (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)fabio_sumara@hotmail.com (2)marciovito@unesc.net

RESUMO

Atualmente, a utilização dos perfis formados a frio (PFF) vem assumindo um papel muito importante no mercado de trabalho. As empresas utilizam cada vez mais este tipo de material devido a sua fácil adaptação geométrica e custo baixo. Dessa forma, o presente trabalho é realizado com o intuito de verificar se os perfis formados a frio, de espessura determinada de 9,52 mm, atingem a resistência de cálculo, analisando também as fissuras provenientes da dobra. A pesquisa desenvolvida assumiu a postura de um estudo comparativo entre a resistência de cálculo e resistência de ensaio. Foi elaborado o projeto dos perfis para fabricação, os quais foram ensaiados em laboratório para verificar sua resistência à flexão e comparar com a resistência de cálculo dos perfis, desconsiderando os coeficientes de majoração e minoração. Os resultados mostram que a resistência de cálculo é inferior a resistência de ensaio.

Palavras-chave: Perfis formados a frio. Resistência. Fissuras. Dobra.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o mercado de trabalho vem investindo muito em pesquisas e em novos materiais, sendo que os perfis formados a frio estão conquistando um grande campo de aplicação. Muitas empresas estão utilizando os perfis de chapa dobrada com espessuras superior a 8 mm, os quais ficam fora da recomendação das normas NBR 14762 (2004) e NBR 6355 (2004), (máximo de 8 mm).

Os perfis formados a frio são produzidos a partir da dobra de chapas a temperatura ambiente. “São dobradas chapas com espessuras a partir de 0,4mm, tendo como limite estabelecido, por norma, até 8 mm, embora se possa ter perfis formados a frio com até 19mm”. (CARVALHO, 2006, p.31).

O presente trabalho pretende verificar se a dobra em perfis de espessura superior ao recomendado pela norma influência na resistência do perfil. O objetivo desta pesquisa é desenvolver, testar e analisar o comportamento de um perfil formado a frio do tipo chapa dobrada com espessura superior ao recomendado pela norma, com isso verificar a influência da dobra na resistência de um perfil, determinando em ensaio se o mesmo atinge a resistência de cálculo.

Estudar o comportamento dos PFF é de grande importância para futuras aplicações deste tipo de material, pois suas geometrias possuem capacidade de serem ajustados até atingirem a resistência desejada, além de serem mais econômicos, quando comparados a perfis laminados.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

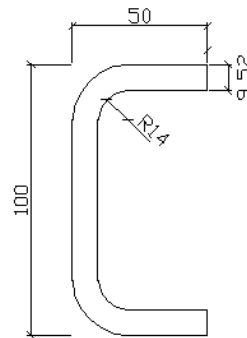
A pesquisa foi desenvolvida da seguinte forma:

- Definir a geometria do perfil;
- Fabricação dos perfis;
- Determinar a máxima carga suportada pelo perfil em função dos esforços obtidos em cálculo;
- Realizar os ensaios de resistência à flexão;
- Avaliar as fissuras provenientes da dobra da chapa.

2.1 DEFINIÇÃO DAS DIMENSÕES DOS PERFIS

As dimensões dos perfis foram definidas com base em uma pesquisa realizada no mercado de trabalho, visando verificar um dos perfis mais utilizados, sendo que a espessura do mesmo foi substituída pela adotada no trabalho. Será realizado o ensaio em seis amostras de 2868 mm. A Figura 1 apresenta as dimensões utilizadas.

Figura 1: Detalhe das dimensões adotadas



Fonte: Do autor (2012)

2.2 FABRICAÇÃO DOS PERFIS

Os perfis formados a frio são produzidos de duas maneiras: através de prensas dobradeiras, que é um processo descontínuo ou perfiladeiras, onde o processo é contínuo (CARVALHO, 2006). O processo utilizado para fabricar os perfis foi através de uma prensa dobradeira com uma capacidade de dobra de 12,7mm.

A aquisição do material foi realizada na empresa Gerdau, a mesma forneceu a análise química e mecânica do material com que foram fabricados os perfis.

As propriedades mecânicas do aço também foram fornecidas pela Gerdau, e pode-se concluir que sua Resistência à ruptura e a Resistência ao escoamento estão dentro do valor colocado pela norma NBR 8800 (2008) para o aço ASTM A36.

De acordo com a NBR 14762 (2010) para que o aço seja trabalhado a frio, deve-se apresentar a relação entre resistência à ruptura e a resistência ao escoamento f_u/f_y maior ou igual a 1,08. O aço escolhido foi o ASTM A36, o qual está de acordo com a solicitação da norma.

2.2.1 Verificações das dimensões dos perfis

Conforme a norma NBR 8800 (2008), as barras não podem ter variação no comprimento superior a 2 mm. Dessa forma, foi elaborada uma tabela para verificar se as dimensões estão de acordo com a norma.

Tabela 1: Verificações das dimensões das amostras.

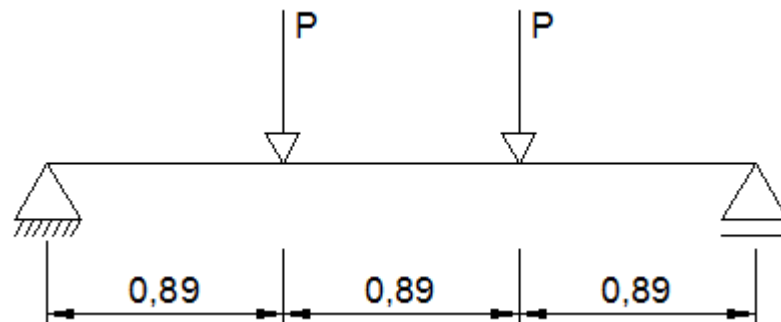
Nº	Comp. (mm)	Aba 1 (mm)	Aba 2 (mm)	Alma (mm)	Peso (kg)
1	2868	49,8	50,8	98,3	35,6
2	2866	50,8	50,0	98,9	35,6
3	2868	49,8	49,6	98,6	35,8
4	2867	50,2	50,5	97,9	35,6
5	2870	49,1	49,9	99,7	35,6
6	2867	51,1	49,9	97,2	35,6

Fonte: Do autor (2012)

2.3 DETERMINAÇÃO DA MÁXIMA CARGA SUPORTADA PELO PERFIL EM FUNÇÃO DOS ESFORÇOS OBTIDOS EM CÁLCULO

O dimensionamento foi conforme prescrição da norma NBR 14762/2010 baseado no método da seção efetiva, desconsiderando todos os coeficientes de majoração e minoração.

Figura 2: Disposição das cargas no perfil



Fonte: Do autor (2012)

- Momento fletor

O momento fletor resistente de cálculo M_{Rd} deve ser tomado como o menor valor calculado, para início de escoamento da seção efetiva, flambagem lateral com torção, flambagem por distorção.



$$\begin{aligned} M_{Sd} &\leq M_{Rd} \\ 0,89P &\leq 11,47 \\ P &\leq 12,89 \text{ kN} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Onde:

P é a carga máxima;

M_{Sd} é o momento fletor solicitante de cálculo.

- Verificação do esforço cortante

A força cortante resistente de cálculo V_{Rd} deve ser calculada pela equação 2.2:

$$\begin{aligned} V_{Sd} &\leq V_{Rd} \\ P &\leq 89,78 \text{ kN} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Onde:

V_{Sd} é a força cortante solicitante de cálculo.

- Momento fletor e força cortante combinados

Para barras sem enrijecedores transversais de alma, o momento fletor solicitante de cálculo e a força cortante solicitante de cálculo na mesma seção, devem satisfazer à expressão de interação 2.3:

$$\begin{aligned} (M_{Sd} / M_{Rd})^2 + (V_{Sd} / V_{Rd})^2 &\leq 1,0 \\ (0,89P / 11,47)^2 + (P / 89,78)^2 &\leq 1,0 \\ P &\leq 12,76 \text{ kN} \end{aligned} \quad (2.3)$$

- Cálculo de deslocamentos

$$d_{\max} = \frac{23PL^2}{648EI} \quad 1,07 = \frac{23 \times P \times 267^3}{648 \times 20000 \times 200,59} \quad P \leq 6,35 \text{ kN} \quad (2.4)$$

$$d_{\max} = \frac{L}{250} \quad d_{\max} = \frac{267}{250} = 1,07 \text{ cm} \quad (2.5)$$

Onde:

d_{\max} é o deslocamento máximo;

L é o comprimento da viga;

E é o módulo de elasticidade;

I é o momento de inércia.

2.4 REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DOS PERFIS

Os ensaios foram realizados no Laboratório Experimental de Estrutura (LEE), localizado no Parque científico e tecnológico - I.Parque - UNESC.

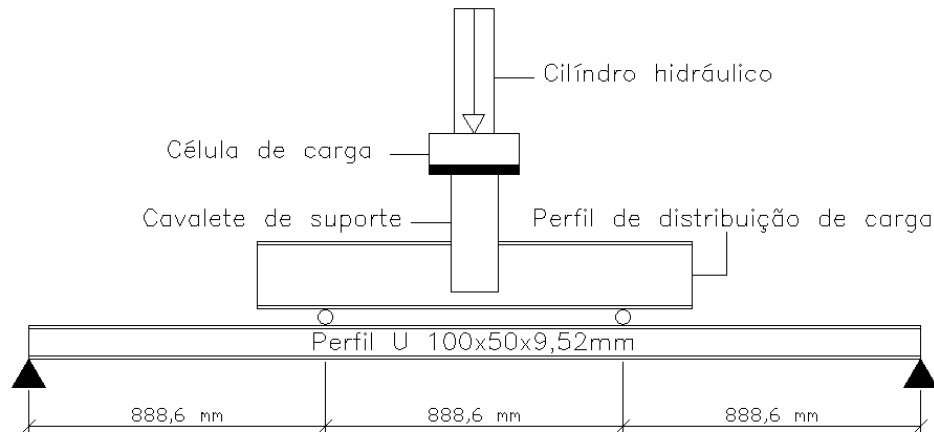
Foram fabricados seis perfis, sendo ensaiado previamente 1 perfil para verificar quais esforços ele suporta. Como não há procedimentos pré-determinados para ensaios de resistência à flexão em quatro pontos de perfis formados a frio, foi feito um estudo preliminar para realizar o ensaio.

O carregamento aplicado foi vertical. Para que o esforço de flexão seja superior a outros esforços, como a torção, a viga foi travada lateralmente.

Para a realização do ensaio utilizou-se um pórtico metálico montado sobre uma laje de reação, uma viga metálica rígida para distribuição da carga, um cilindro hidráulico de marca ENERPAC com capacidade de 500 KN para aplicação da carga, uma célula de carga para medir a força, a qual foi posicionada entre o cilíndrico hidráulico e a viga metálica, um transdutor de deslocamento do tipo LVDT de 100 mm da marca HBM usado para medir os deslocamentos verticais no centro do vão, além do equipamento de aquisição de dados Quantum X que utiliza o software Catman Easy, ambos marca HBM.

A força aplicada aumentará gradualmente e será registrado os deslocamentos e cargas ao longo de todo o ensaio. Segue a figura 3 ilustrando como foi realizado o ensaio.

Figura 3: Disposição da viga no ensaio



Fonte: Do autor (2012)

2.4.1 Realização do ensaio teste sem contenção lateral

O perfil 1 foi apoiado em dois cavaletes e as cargas foram aplicadas no perfil através de dois roletes, como detalhado no item 2.4. No centro da viga foi posicionado um transdutor de deslocamento do tipo LVDT, para medir o deslocamento vertical, conforme figura 4:

Figura 4: Ensaio teste do perfil 1



Fonte: Do autor (2012)

Figura 5: Perfil sofrendo torção

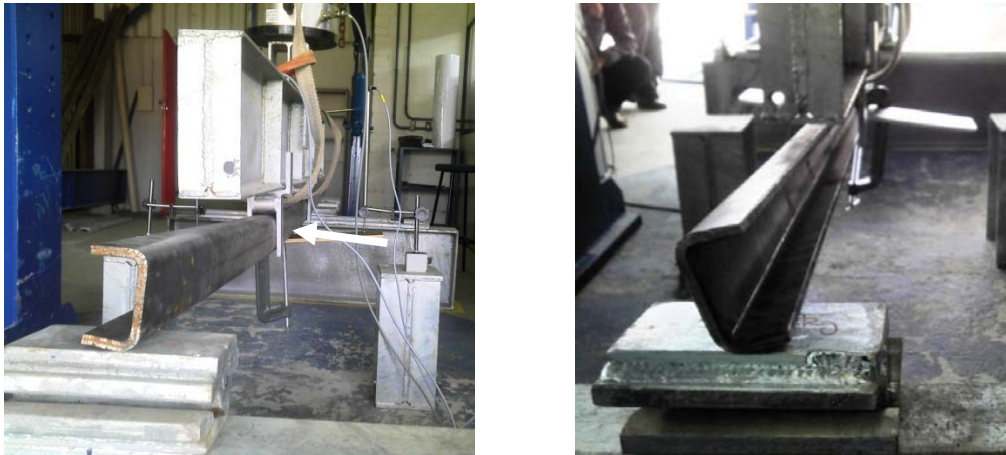


Fonte: Do autor (2012)

Ao decorrer do ensaio, pode ser verificado que o perfil estava sujeito a torção, pois o LVDT estava fixado no centro da viga e com a torção a flecha sofreu uma troca de sentido. O ensaio foi interrompido devido à existência de torção exagerada do perfil.

Como não foi possível concluir o ensaio do perfil 1 devido à torção que o mesmo sofreu, foi desenvolvido um rolete com contenção lateral.

Figura 6: Ensaio com contenção lateral nos roletes



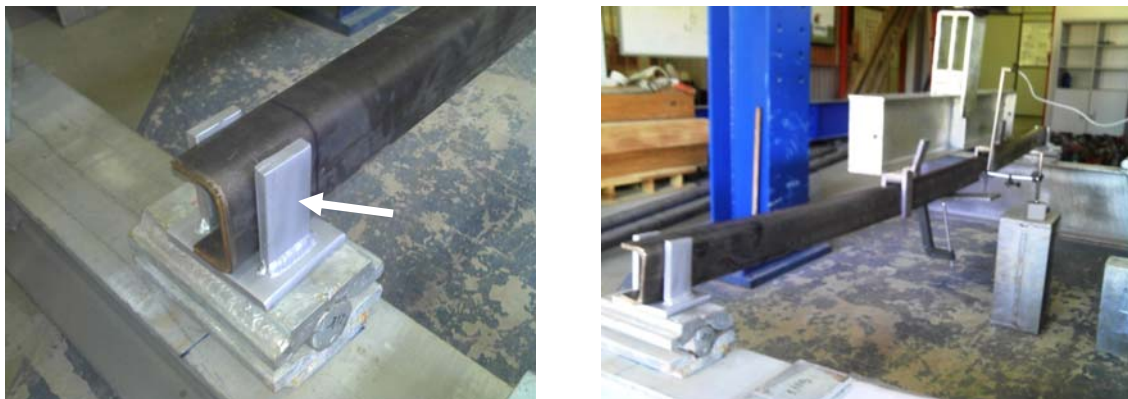
Fonte: Do autor (2012)

Com as contenções laterais foi possível levar o perfil à ruptura, sendo que nos apoios, os mesmos estavam livres e ocorreu o esforço de torção, como pode ser verificado na figura 6.

2.4.2 Realização dos ensaios com contenção lateral nos apoios

Após todos os ensaios teste, foram preparados os demais perfis para os ensaios. Para minimizar a torção, foi elaborado apoios com contenção lateral.

Figura 7: Ensaio com contenção lateral nos apoios



Fonte: Do autor (2012)

2.5 FISSURAS PROVENIENTES DA DOBRA

Após a fabricação dos perfis, pode ser observado a abertura de fissuras nas extremidades das peças, conforme figura 8.

Figura 8: Perfis dobrados



Fonte: Do autor (2012)

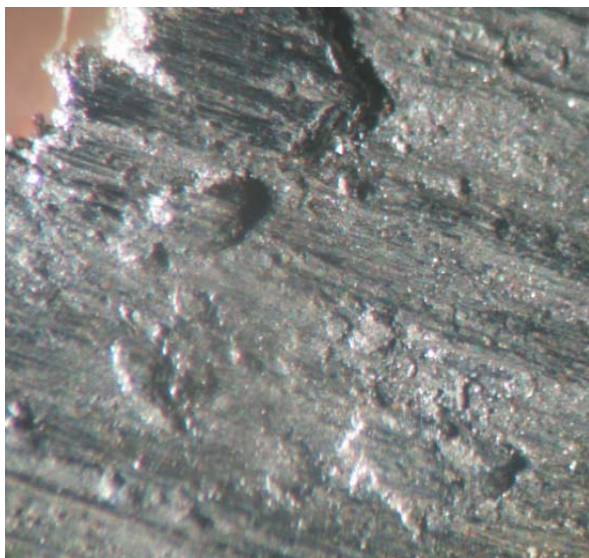
Para analisar as fissuras, foi realizado um estudo metalográfico na área da conformação a frio, foi extraída uma amostra com 50 mm da extremidade conforme Figura 9. Inicialmente foi feita uma análise macroscópica com o aumento de 15X, onde não foi possível observar fissuras. Para confirmar o resultado, foi realizado uma microscopia com aumento de 200X, onde as amostras foram preparadas com a utilização de lixas de 80, 120, 320, 400, 500, 600, 800 e 1200, feito também um polimento em alumina 1um, ataque em Nital 3% (Acido Nitrico com álcool etílico), onde comprovou-se que as fissuras ocorreram apenas nas extremidades.

Figura 9: Amostra



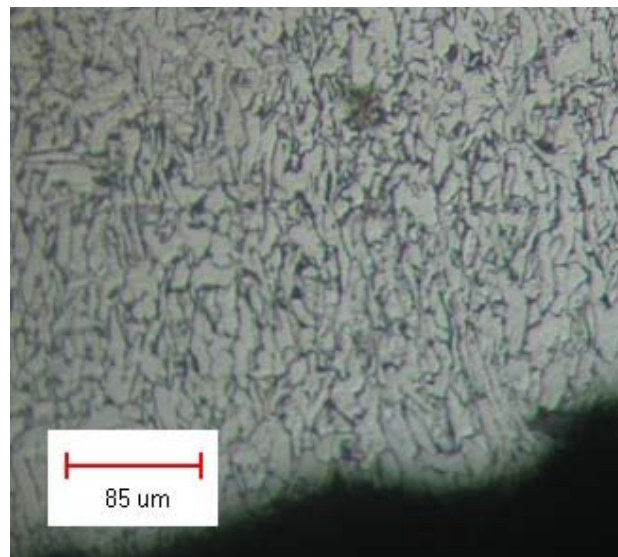
Fonte: Do autor (2012)

Figura 10: Análise macroscópica



Fonte: Do autor (2012)

Figura 11: Análise microscópica



Fonte: Do autor (2012)

Segundo Pfeil (2010) o raio interno de dobragem deve respeitar valores mínimos especificados, para impedir a fissuração do aço na dobra.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

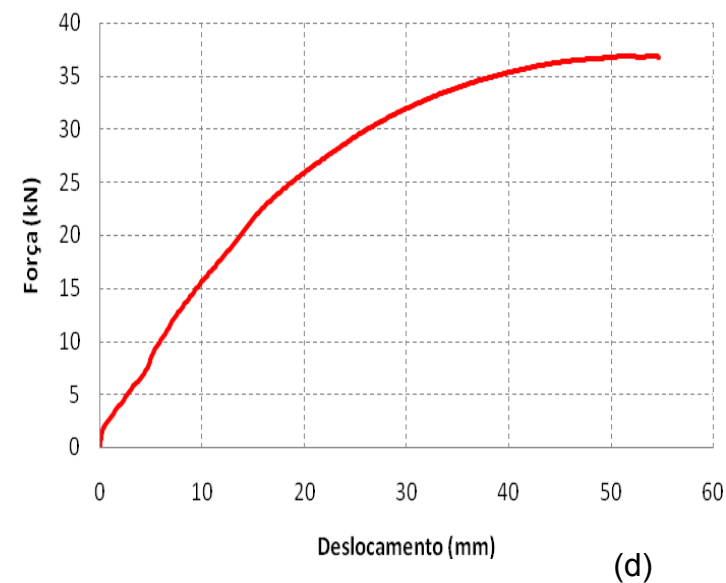
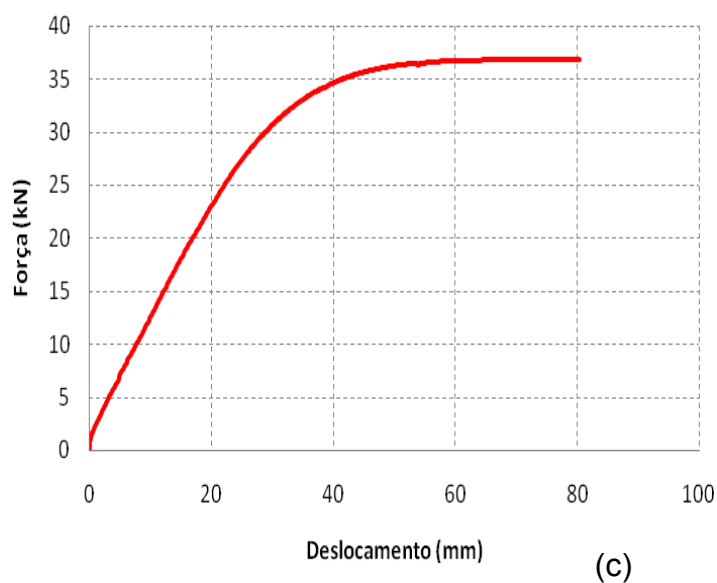
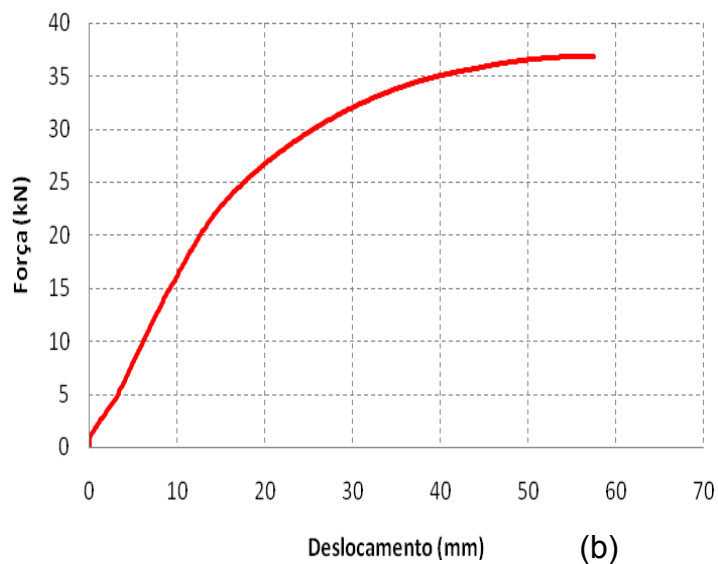
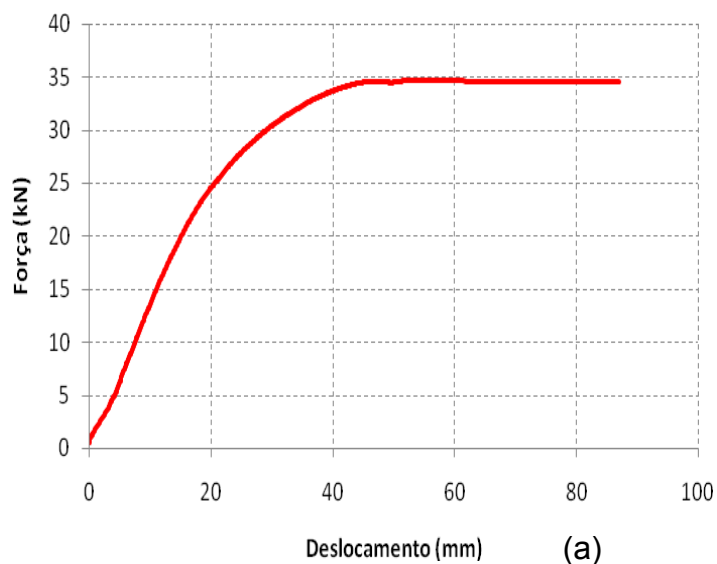
A similaridade dos resultados obtidos no ensaio conduz ao comportamento constante do material sob as condições do ensaio. Apresentam-se na tabela 2, as cargas últimas e os deslocamentos referente as cargas juntamente com a média e o desvio padrão das amostras. A figura 12 mostra os gráficos de quatro amostras.

Tabela 2: Resultados obtidos nos ensaios à flexão simples

Nº	Perfil	Carga última (kN)	Valor Médio (kN)	Flecha (mm)	Valor Médio (mm)
1	U 100x50x9,52mm	35,43		53,35	
2	U 100x50x9,52mm	34,63		52,54	
3	U 100x50x9,52mm	36,81	35,99 ± 0,99	55,94	53,68 ± 1,80
4	U 100x50x9,52mm	36,79		-	
5	U 100x50x9,52mm	36,98		51,54	
6	U 100x50x9,52mm	35,29		55,05	

Fonte: Do autor (2012)

Figura 12: Força x deslocamento, (a) perfil 2, (b) perfil 3, (c) perfil 4, (d) perfil 5



Fonte: Do autor (2012)



A resistência do perfil 1 foi de 35,43kN; para o ensaio do mesmo não houve contenção lateral nos apoios, comparando com a média dos ensaios com contenção, que foi de 36,10kN, observando-se resultados similares. Pode ser constatado que a contenção lateral nos apoios não influenciou na resistência do perfil, com isso, foi inserido a amostra 1 na média das resistência, que foi de 35,99kN.

Com base na norma NBR 14762 (2010), foram realizados os cálculos para verificar a máxima carga suportada pelo perfil, desconsiderando todos os coeficientes de minoração e majoração, a carga de cálculo foi de 25,52kN. O valor mostra que a resistência de cálculo foi 10,47kN inferior a do ensaio, estes resultados comprovam que a dobra não prejudicou a resistência do perfil. Para flecha admissível máxima de 1,07cm o valor da carga de cálculo foi de 12,70kN, comparando com a média dos valores de ensaio que foi de 15,42kN para o mesmo deslocamento, esta diferença confirma que o trabalho a frio não influenciou na flecha.

É de extrema importância relatar o comportamento do perfil no ensaio devido a carga aplicada, quando o perfil atingiu nível de carregamento crítico, já deformado verticalmente, transladou-se de sua posição indeformada e torceu. Este fenômeno é conhecido como flambagem lateral com torção, ocorre em vigas submetidas à flexão simples, onde o modo de flambagem é resultado da instabilidade longitudinal da viga (CARVALHO, 2006).

Outro resultado importante notado no ensaio foi a capacidade do perfil se deformar (ductilidade), quando a carga era aliviada, sua deformação se recuperava parcialmente com muita facilidade.



4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado os fundamentos teóricos sobre o aço e suas propriedades, com ênfase no perfil formado a frio. Foi definido a geometria do perfil com base em uma pesquisa realizada no mercado de trabalho, adotando-se então perfil de 100x50x9,52mm. Para verificar a máxima carga de cálculo suportada pelo perfil, foi utilizada a prescrição da norma NBR 14762/2010, desconsiderando todos os coeficientes de majoração e minoração.

Foram fabricadas seis amostras para realizar o ensaio, através do processo de prensa dobradeira, uma das amostras foi ensaiada previamente para verificar a quais esforços estava sujeita, sendo que não foi possível romper o perfil, pois o mesmo sofreu torção. Com isso, foi desenvolvida uma contensão lateral nos roletes e nos apoios, podendo então dar continuidade ao processo. A similaridade dos resultados do ensaio entre as amostras apontou que o experimento ocorreu de maneira correta.

No decorrer do ensaio foi analisado que os perfis possuem uma ductilidade elevada, pois com o alívio da carga, as vigas ensaiadas tinham uma capacidade de recuperar parte de sua deformação.

Com o estudo metalográfico foi confirmado que as fissuras se localizam apenas nas extremidades dos perfis.

Pode ser verificado que a resistência de cálculo foi muito inferior a do ensaio. Dessa forma, foi constatado que o trabalho a frio não influenciou na resistência e na ductilidade do material.

Os resultados obtidos na pesquisa mostram que as empresas podem utilizar perfil formado a frio com espessura de 9,52mm, obedecendo o processo de dobragem adotado para este ensaio, para espessuras superiores a este valor, devem ser realizados novos estudos que comprovem a confiabilidade do material.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguindo a linha de pesquisa, sugerem-se algumas alternativas para pesquisas futuras, quais sejam:



- Realizar o ensaio de resistência em um perfil formado a frio galvanizado por imersão a quente, analisar a influência da galvanização na resistência do perfil;
- Analisar a influência da dobra na resistência em perfis formados a frio de espessuras superior a utilizada neste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14762. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio: procedimento.** Rio de Janeiro: ABNT, 2001. 53 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14762. **Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 87 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Coletânea de perfis de aço formados a frio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 53 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 8800. **Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios.** Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 237 p.

CARVALHO, Paulo Roberto Marcondes de et al. **Curso básico de perfis de aço formados a frio.** 2. ed Porto Alegre: [s.n.], 2006. 374 p.

PFEIL, Walter; PFEIL, Michele. **Estruturas de aço: dimensionamento prático.** 8. ed Rio de Janeiro: LTC, 2010. 357 p.